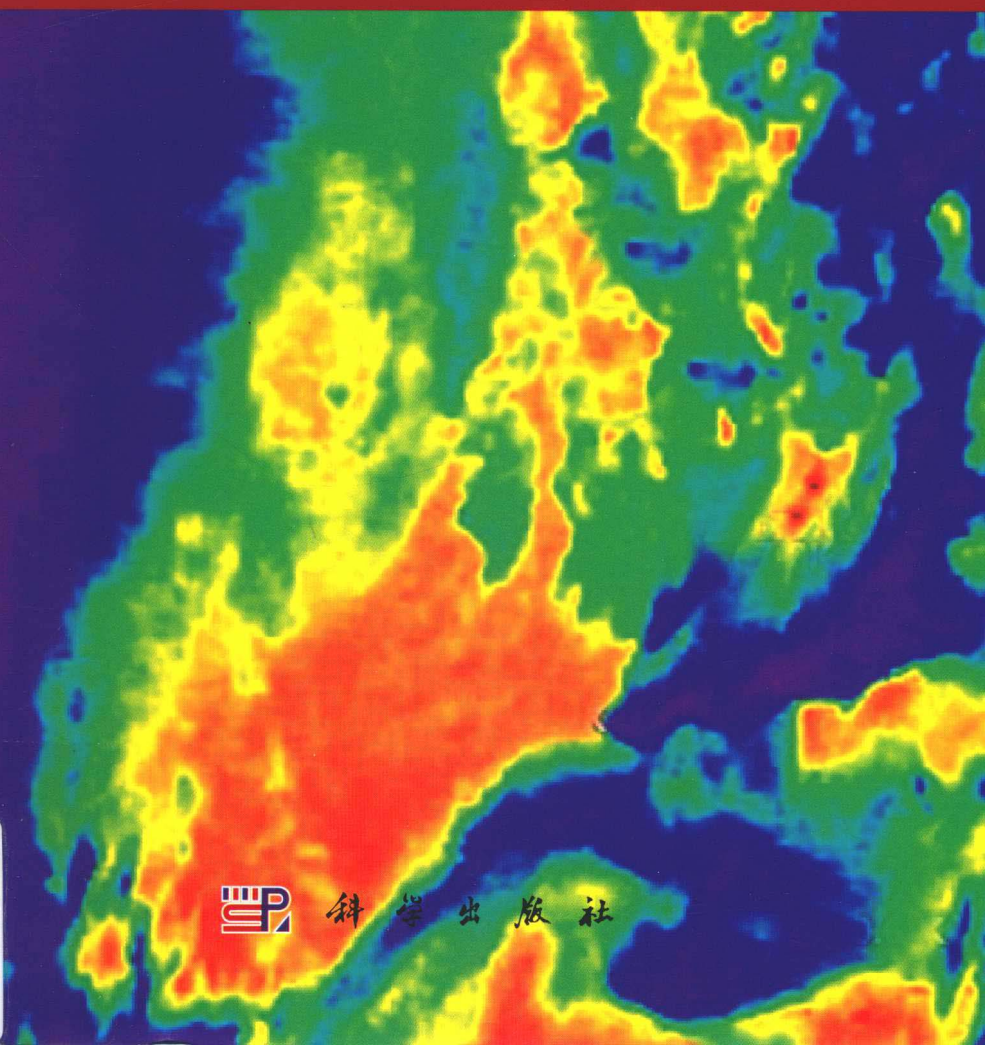


基于特征的红外图像 目标匹配与跟踪技术

李俊山 张 姣 杨 威 朱英宏 郭莉莎 著



科学出版社

基于特征的红外图像目标 匹配与跟踪技术

李俊山 张 姣 杨 威 著
朱英宏 郭莉莎

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕红外图像目标的稳定特征提取、基于局部不变特征的红外与可见光图像匹配、基于特征的红外图像目标跟踪等内容,系统阐述围绕红外图像和红外与可见光图像开展的图像特征提取、图像匹配、红外图像目标跟踪等研究中涉及的理论和关键技术,涵盖了图像应用中涉及的核心内容。本书内容理论与实践并重,针对性与系统性较强,具有重要的理论和应用参考价值。

本书可供计算机科学与技术、信息与通信工程、控制科学与工程、测绘科学与技术、光学工程、医学技术等学科中从事图像处理与分析、目标识别与跟踪、面向成像精确制导的景象匹配和前视目标跟踪,以及计算机视觉等方面研究的科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于特征的红外图像目标匹配与跟踪技术/李俊山等著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-11888

I. ①李… II. ①李… III. ①红外探测-图像处理 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第215368号

责任编辑:鞠丽娜 童安齐 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年10月第一次印刷 印张:12

字数:226 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BZ08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

红外成像以其被动工作、抗干扰性好、目标识别能力强、全天候工作等特点,使得红外图像处理已经成为 21 世纪信息处理中的一项十分重要的技术,并在导弹成像精确制导、异源图像目标识别与跟踪、海关缉私、航空测量、资源勘探、损伤探测、生物医学等领域得到了越来越广泛的应用,成为信息化社会和国防建设中的最重要的支撑技术之一,具有十分广阔的发展和应用前景。

一方面,由于红外图像具有对比度低、边缘模糊、信噪比低、成分复杂等缺点;另一方面,由于信息技术的迅猛发展及其在军事领域里的广泛应用,复杂战场环境中目标的灵活性、机动性不断提高,伪装和隐身能力不断增强,同时受大气热辐射、远作用距离、探测器噪声等因素影响,成像传感器探测到的目标的局部细节的灰度差异不明显,特别是在检测到的信号相对较弱,背景有非平稳起伏干扰情况下,目标边缘有可能被大量杂波、噪声所淹没,导致图像信噪比降低、形状和结构的信息不足,使得目标的检测、识别和跟踪变得更加困难。因此,基于特征的红外图像目标匹配与跟踪技术就成为红外成像及其应用中的关键和热点课题。

本书主要针对国防应用中的前视红外目标匹配识别与跟踪等应用需求,以可见光与红外图像中的角点特征、边缘特征、直线特征、纹理特征,以及基于这些特征而构建的图像描述子特征,从红外图像目标的特性描述和特征提取出发,对红外与可见光图像基于特征的匹配与跟踪技术进行了系统研究,并进行了有效的分析和实验验证。

本书共分为三篇 13 章。第一篇是红外图像目标的稳定特征提取,由第 1 章红外图像的局部不变特征、第 2 章基于 FAST-9 的多尺度快速检测子、第 3 章基于改进曲率尺度空间的图像特征点检测共 3 章内容组成。第二篇是基于局部不变特征的红外与可见光图像匹配,由第 4 章基于梯度的红外与可见光图像特征点描述与匹配、第 5 章基于自相似性的红外与可见光图像特征匹配、第 6 章基于形状上下文的红外

与可见光图像特征匹配、第 7 章基于 LBP 的红外与可见光图像特征描述与匹配、第 8 章多特征结合的红外与可见光图像特征点匹配、第 9 章基于线特征的红外与可见光图像匹配、第 10 章基于图像变换模型的误匹配特征剔除共 7 章内容组成。第三篇是基于特征的红外图像目标跟踪，由第 11 章基于空间直方图特征的红外目标均值漂移跟踪方法、第 12 章基于多特征融合的红外目标跟踪方法、第 13 章基于在线学习的红外目标分类跟踪方法共 3 章内容组成。

本书内容是作者所在团队承担的有关国家自然科学基金项目和国防预研项目研究成果的总结。参加本书内容研究的主要成员有李俊山、张姣、杨威、朱英宏、郭莉莎、赵方舟、杨亚伟、史德琴、朱秋旭等。在本书内容的研究和撰写过程中，参考和引用了一些文献中的观点和素材，在此向这些文献的作者表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免有不妥之处，敬请各位读者和专家批评指正。

李俊山

2014 年“五一”节于西安

电子信箱: lijunshan403@163.com

目 录

第一篇 红外图像目标的稳定特征提取

第 1 章 红外图像的局部不变特征	3
1.1 图像局部不变特征的基本理论	3
1.1.1 图像特征概述	3
1.1.2 局部不变特征的性质	4
1.1.3 特征检测算法的研究现状	5
1.1.4 特征描述算法的研究现状	6
1.2 几种最典型的图像特征检测算法	8
1.2.1 角点特征检测算法	8
1.2.2 斑点特征检测算法	11
1.2.3 区域特征检测算法	11
1.3 典型特征检测算法性能评价	11
第 2 章 基于 FAST-9 的多尺度快速检测子	16
2.1 尺度空间理论	16
2.1.1 多尺度表达	16
2.1.2 尺度空间	17
2.1.3 高斯尺度空间的建立	17
2.2 基于 FAST-9 的角点提取	19
2.2.1 FAST 角点检测算法	19
2.2.2 基于多尺度的 FAST-9 角点提取	22
2.2.3 实验结果与分析	23
第 3 章 基于改进曲率尺度空间的图像特征点检测	28
3.1 曲率角点检测	28
3.1.1 曲线尺度空间	28
3.1.2 曲率尺度空间角点检测	29
3.2 改进的 CSS 特征点提取方法	30
3.2.1 改进的 CSS 角点检测算法	31
3.2.2 实验结果与分析	32

第二篇 基于局部不变特征的红外与可见光图像匹配

第4章 基于梯度的红外与可见光图像特征点描述与匹配	39
4.1 SIFT 算法及红外与可见光图像特征点梯度分析	39
4.1.1 尺度空间关键点的检测	39
4.1.2 关键点的精确定位	40
4.1.3 关键点主方向分配	42
4.1.4 SIFT 描述子构造	42
4.1.5 特征匹配	43
4.1.6 基于 SIFT 算法的红外与可见光图像梯度分析	45
4.2 基于 CSS 的特征点梯度匹配算法	46
4.2.1 剔除低对比度特征点	46
4.2.2 特征点主方向构成	46
4.2.3 镜像的 SIFT 特征点描述	47
4.2.4 描述子匹配	48
4.2.5 实验结果与分析	48
第5章 基于自相似性的红外与可见光图像特征匹配	53
5.1 自相似性目标识别算法的性能分析	53
5.2 基于平方和的图像预处理	54
5.3 基于自相似性的红外与可见光图像特征描述与匹配方法	55
5.3.1 特征点提取	56
5.3.2 基于相关平面的特征点描述	56
5.3.3 剔除不良描述子与描述子匹配	57
5.3.4 实验结果与分析	58
第6章 基于形状上下文的红外与可见光图像特征匹配	62
6.1 形状上下文算法	62
6.1.1 形状上下文	62
6.1.2 形状上下文算法步骤	62
6.1.3 形状上下文算法的特点	64
6.2 红外与可见光图像边缘特征提取方法	64
6.2.1 特征点提取	64
6.2.2 特征点边缘特性分析	64
6.2.3 特征点边缘拆分/重组	65

6.2.4 特征点主方向构成	66
6.3 基于形状上下文的特征点描述和匹配方法	67
6.3.1 特征点的子邻域描述	67
6.3.2 级联描述子的构造	67
6.3.3 描述子匹配	68
6.3.4 实验结果与分析	68
6.3.5 算法复杂度分析	72
第7章 基于LBP的红外与可见光图像特征描述与匹配	73
7.1 LBP特征描述子	73
7.1.1 经典的LBP算子	73
7.1.2 圆形邻域的LBP算子	74
7.1.3 均匀LBP算子	74
7.2 基于S-LBP的级联描述子匹配算法	75
7.2.1 特征点提取和主方向构造	75
7.2.2 基于S-LBP的级联描述子构造	75
7.2.3 基于S-LBP描述子的匹配运算	77
7.2.4 实验结果与分析	77
7.2.5 算法复杂度分析	80
第8章 多特征结合的红外与可见光图像特征点匹配	82
8.1 多特征相关技术研究概述	82
8.1.1 同步多特征匹配	82
8.1.2 异步多特征匹配	82
8.2 基于梯度与自相似性的同步多特征匹配算法	84
8.2.1 特征点提取和主方向构造	85
8.2.2 自相似性描述子构造	85
8.2.3 同步多特征描述子构造	85
8.2.4 加权匹配	86
8.2.5 实验结果与分析	87
8.3 基于梯度与特征点邻域边缘的异步多特征图像匹配算法	90
8.3.1 特征点提取与主方向构造	90
8.3.2 基于梯度的描述子构造和粗匹配	90
8.3.3 特征点邻域边缘描述子	91
8.3.4 特征点精匹配	91

8.3.5 实验结果与分析	91
第9章 基于线特征的红外与可见光图像匹配	94
9.1 直线提取算法	94
9.1.1 典型的检测算法分析	94
9.1.2 基于 Canny 算法的直线提取	95
9.1.3 快速直线检测算法	95
9.2 直线描述子	97
9.2.1 典型的直线描述子分析	97
9.2.2 均值-标准差描述子	97
9.3 基于 Haar 小波的直线描述与匹配算法	99
9.3.1 Haar-like 特征及提取方法	99
9.3.2 构建 Haar 直线描述子	101
9.3.3 分级特征匹配	103
9.3.4 实验结果与分析	104
9.4 基于梯度方向直方图不变矩的直线配准算法	110
9.4.1 不变矩特征	110
9.4.2 直线主方向的确定	111
9.4.3 直线区域构成	111
9.4.4 梯度方向直方图不变矩的构成和匹配	112
9.4.5 实验结果与分析	113
9.5 直线和点结合的红外和可见光图像匹配	116
9.5.1 直线的提取	116
9.5.2 直线 Haar 描述子和粗匹配	116
9.5.3 虚拟点的精匹配	117
9.5.4 实验结果与分析	117
第10章 基于图像变换模型的误匹配特征剔除	122
10.1 图像匹配的映射变换和空间变换模型	122
10.1.1 图像匹配的映射变换	122
10.1.2 图像空间变换模型	122
10.2 RANSAC 算法	123
10.3 基于支持向量回归的误匹配点对剔除	125
10.3.1 支持向量回归思想	125
10.3.2 基于 SVR 的误匹配点对剔除算法	127

10.4 实验与分析	128
10.4.1 实验数据与评价	128
10.4.2 实验结果与分析	128

第三篇 基于特征的红外图像目标跟踪

第 11 章 基于空间直方图特征的红外目标均值漂移跟踪方法	135
11.1 相关研究概述	135
11.2 均值漂移跟踪理论	137
11.2.1 核密度估计	137
11.2.2 均值漂移	139
11.3 红外图像目标的表示与定位	139
11.3.1 联合空间颜色模型	140
11.3.2 相似性度量	141
11.3.3 目标定位及跟踪算法	142
11.4 实验结果与分析	143
第 12 章 基于多特征融合的红外目标跟踪方法	145
12.1 相关研究概述	145
12.2 目标特征选择	146
12.2.1 颜色特征	146
12.2.2 边缘特征	147
12.2.3 纹理特征	148
12.2.4 梯度特征	150
12.3 基于多特征的红外目标表示与定位	150
12.3.1 红外目标的多特征描述	150
12.3.2 相似性度量与特征权重自适应选择	151
12.3.3 目标模型自适应更新	152
12.4 实验结果与分析	154
第 13 章 基于在线学习的红外目标分类跟踪方法	159
13.1 相关研究概述	159
13.2 集成学习和 Boosting 理论	160
13.2.1 集成学习	160
13.2.2 Boosting 理论	161
13.2.3 AdaBoost 模型	162

13.3 基于在线 Boosting 的红外目标分类跟踪	164
13.3.1 基于在线 Boosting 的特征选择	164
13.3.2 特征及弱分类器设计	165
13.3.3 Haar-like 特征	166
13.3.4 2bitBP 特征	167
13.3.5 弱分类器选择	167
13.3.6 跟踪算法	168
13.4 实验结果与分析	169
参考文献	173

第一篇 红外图像目标的稳定特征提取

红外图像是利用红外热成像技术,通过“测量”物体向外辐射的热量而获得的。红外图像与可见光图像相比具有分辨率低、对比度差、信噪比低等缺陷,特别是红外图像的灰度分布与目标的反射特性不具有线性关系,所以红外图像目标的匹配识别与跟踪一般都采用基于特征的方法。

红外图像的局部稳定特征是指描述红外图像中局部区域的那些特征,如角点特征、边缘特征、直线特征、纹理特征,以及基于这些特征而构建的描述图像的特征。由于红外图像的局部稳定特征具有低冗余性,具有对旋转、尺度和仿射的不变性,已成为视觉条件变化下图像特征表达的强有力工具。红外图像的局部稳定不变特征的提取方法研究已经成为一个非常活跃的研究方向,利用局部稳定特征进行红外图像目标匹配与跟踪已经成为红外图像处理与分析的主流方法。

本篇主要介绍红外图像目标局部稳定特征的提取方法,包括红外图像的局部不变特征、基于 FAST-9 的多尺度快速检测子、基于改进曲率尺度空间的图像特征点检测共 3 章内容。

第 1 章 红外图像的局部不变特征

由于红外图像具有分辨率低、对比度差、视觉效果模糊和信噪比低等缺陷,利用红外图像的全局特征进行目标识别极易造成误识别。红外图像的局部不变性特征是指描述红外图像中局部区域的那些特征,它既能确切地描述目标的局部特征,具有低冗余性,在处理速度和处理效率上占据优势;又克服了图像变化对特征表达的影响,具有旋转不变性、尺度不变性、仿射不变性、光照不变性等,已成为视觉条件变化下特征表达的强有力工具。因此,红外图像的局部不变特征提取方法研究已成为一个非常活跃的研究方向,利用局部不变特征识别红外图像目标已经发展成红外图像处理的主流方法。

红外图像局部不变特征的提取方法一般分为两个基本步骤:①局部不变特征检测,即在红外图像中确定检测特征的位置,与其对应的算法称为检测子算法;②局部不变特征描述,是一种对红外图像局部特征的定量化数据描述方法,与其对应的算法称为描述子算法。

本章首先介绍图像局部不变特征的基本理论,然后介绍几种最典型的图像特征检测方法^[1],最后对目前最典型的 21 种特征检测算法的性能给予比较和评价^[1,2]。

1.1 图像局部不变特征的基本理论

局部不变特征理论涉及图像局部不变特征的概念和性质,以及局部不变特征的检测方法和描述方法。

1.1.1 图像特征概述

图像特征是由拍摄场景的物理和几何特性使图像中局部区域的灰度产生明显变化而形成的。理论上,特征是图像灰度曲面的不连续点;在实际图像中,特征表现为在一个微小邻域中灰度的急剧变化,或灰度分布的不均匀性,也就是在局部区域中具有较大的信息量。在不同目标图像上提取特征时,希望提取的特征尽量能反映目标图像的重要的、本原的属性,这样的特征即为图像的重要特征和本原特征。进一步讲,所谓重要特征是指它们作为分量的特征点在特征空间中同类聚集、异类分散;当使用距离测度时,同类的特征点距离较小,异类的特征点距离较大。所谓本原特征是指特征绝对性尽量地强,最大限度地不依赖于提取目标

特征时的条件和环境。对于图像而言,不仅希望特征不随获取目标图像的视点不同而变化,甚至不因光照、遮挡、模糊、噪声的存在而改变^[3]。

利用整幅图像的信息提取的不变特征是全局不变特征。目前,绝大多数景象匹配算法提取的都是图像的全局不变特征。全局不变特征可以较好地解决同一目标的一致性判决问题,但提取图像的全局特征很难消除图像的成像畸变;当图像之间的成像畸变很复杂时,利用全局特征进行景象匹配就非常困难,效果很差;特别是当存在局部遮挡时,基于全图信息的特征会随之发生变化,利用全局特征进行景象匹配极易出现误匹配。一种克服全局特征局限性的方法是将图像整体分割为若干个组成部分,对每一个部分提取全局特征,这样就将一个整体图像特征的提取问题分解为若干个局部特征的提取问题^[4]。

局部特征与全局特征最大的区别是特征抽取的空间范围不同。全局特征是从整个图像中抽取的特征,而局部特征则是从图像中局部区域中抽取的特征^[5]。与全局特征相比,局部特征不需要对图像进行边缘提取或区域分割等预处理,大大简化了提取不变特征的程序,它只利用目标局部区域的信息构造特征量。由于一定数目的局部区域可能离散地出现在图像的不同位置,当对每个区域独立地提取特征时,即使图像有部分遮挡或有部分受到严重噪声干扰,通过局部特征提取仍可得到图像的部分信息,从而实现图像之间的匹配。由于局部特征一般包含图像中部分空间范围,与提取全局特征相比,搜索空间小,匹配速度快^[4]。与传统意义上的分割不同,局部特征的边界和图像内容(颜色或纹理)变化并没有直接的对应关系。例如,颜色均一的区域未必有局部特征覆盖,而不同局部特征覆盖的区域可以相互有重叠。在理想情况下,人们总是期望局部特征对应的是客观世界中物体的一部分,这在实际中是不现实的,实际上往往需要借助图像处理技术对高层场景进行理解。

1.1.2 局部不变特征的性质

图像的局部特征在保留了图像中物体重要特征信息的同时,又有效地减少了信息的数据量,因而特征提取和描述成为图像处理和计算机视觉的基本技术。一种好的局部特征应具备以下性质^[5]:

- 1) 可重复性。同一个物体或场景在不同的视角下,两幅图像中对应特征越多越好。
- 2) 独特性。特征的幅值模式需要呈现多样性,这样的特征才能被区分和匹配。
- 3) 局部性。特征应该是局部的,从而减少被遮挡的可能性,并且允许用简单的模型来近似(不同角度拍摄下)两幅图像间的几何和成像变形。
- 4) 数量性。检测到的特征数目一定要多,即使是小的物体上也有足够的特征。理想的情况是检测到的特征数量在一个比较大的范围内,然后通过一个

简单的阈值就可以调整。特征的密集度最好能在一定程度上反映图像的内容。

5) 准确性。得到的特征应该能被精确定位，这里的定位不仅仅是指在图像中的空间位置，还包括该特征的尺度等。

6) 高效性。在图像中特征的检测时间效率越高越好。以便于满足实时性应用要求。

在上述的 6 个性质中，最重要的是局部特征的可重复性。关于可重复性，主要依赖于如下两个方面的性质^[5]：

1) 不变性。指局部特征不随图像大的变形而改变。对于大的图像变形往往需要先对这些变形进行建模，然后再设计不受这些变形影响的特征检测算法。

2) 鲁棒性。指局部特征对于小的变形应该不敏感。这类小的变形包括图像噪声、离散化效应、压缩、图像模糊，当然还包括由数学建模引入的小的几何或成像形变等因素。

1.1.3 特征检测算法的研究现状

局部不变特征的检测和提取算法是进行不变特征描述的基础。检测方法本质上可认为是对图像中的兴趣区域（region of interest, ROI）进行坐标定位。不变特征检测算法可分为角点检测子、斑点检测子和区域检测子^[6]，如表 1.1 所示。

表 1.1 检测子的分类

分类	年份	检测子
角点检测子	1977	Moravec
	1978	Beaudet
	1982	Dreschler 和 Nagel
	1982	Kitchen 和 Rosenfeld
	1987	Förstner
	1988	Harris
	1990	Deriche 和 Giraudon
	1995	Wang 和 Brady
	1997	SUSAN
	1998	Trajkovic
	1998	CSS
	2006	FAST
斑点检测子	1965	DoG
	2001	Multi-Scale Harris
	2001	SR
	2004	SIFT
	2006	SURF

续表

分类	年份	检测子
区域检测子	2001	Salient Region
	2004	EBR
	2004	IBR
	2004	MSER
	2004	Hessian-Affine
	2004	Harris-Affine

1977 年, Hans^[7]提出了关于角点的最原始算法, 当时他使用了兴趣点这个概念, 利用灰度自相关函数来考虑目标像素和其相邻像素的相似性。该算法有很多局限性, 如不具备旋转不变性, 对噪声敏感, 并且对边缘处理不好等。为了解决这些问题, 1988 年 Harris 等^[8]提出了 Harris 角点检测算法。采用微分算子和矩阵特征值判定角点, Harris 角点比 Hans 角点具有更高的检测率和重复率, 并且具有旋转不变性和灰度平移不变性, 至今在某些应用中仍被使用, 但不具备尺度不变性是其最大不足。在局部不变特征的历史上, 特别值得一提的是 Lindeberg 在 20 世纪 90 年代系统提出的信号尺度空间理论^[9], 通过改变尺度参数, 实现尺度不变性。随后, 借助尺度的概念, Mikolajczyk 和 Schmid 提出了 Harris-Laplace 和 Harris-Affine 检测子^[10]。Harris-Laplace 检测子将 Harris 检测子与高斯尺度空间相结合, 增加了尺度不变性。Harris-Affine 检测子能自动检测仿射变换下的图像特征, 且具有仿射不变性。1999 年, Lowe 提出尺度不变特征变换 (scale invariant feature transform, SIFT) 算法^[11,12], 使用高斯差分算子 (DoG) 近似 LoG 算子, 加快了特征提取的速度。SIFT 特征在图像旋转、尺度变换、仿射变换和视角变化下都有很好的不变性。2006 年, Bay 沿着 Lowe 的思路, 提出了 SURF (speeded up robust features) 算法^[13]。通过积分图像和 Haar 小波相结合, 进一步提高了特征提取的速度。2006 年另一项有影响力的局部特征研究是 Rosten 等提出的 FAST (features from accelerated segment test) 角点检测子^[14,15], 而后又通过引入机器学习和 ID3 决策树的方法对其进行了改进, 与其他角点检测子相比, 大大提高了检测速度, 并具有较高的可重复性和抗噪性, 但其缺点是缺乏尺度不变性。

1.1.4 特征描述算法的研究现状

在特征提取之后, 如何使用或选择一种合适的特征描述算法来描述特征, 是目标识别过程中的又一重要步骤。图像识别过程往往是两幅图像之间进行相似性比较的过程, 由于红外图像存在细节难以辨认, 特征信息不明显等问题, 为了实现相似性度量, 选择一种紧凑而完整的特征描述子是非常重要的。特征描述子是